

콘크리트슬래브궤도 체결장치의 패드강성에 따른 궤도/교량의 거동 분석

The Behaviour of Track/Railway Bridge according to Pad Stiffness of Fastener System on Concrete Slab Track

이준호* 성덕룡** 박용걸*** 김성일****
Lee, Jun-Ho Sung, Deok-Yong Park, Yong-Gul Kim, Sung-Il

ABSTRACT

Construction of concrete slab track is trending to increase gradually in national and international for reduction in track maintenance cost and secure of ride comfort. But elastic pad becomes superannuated due to repeated train operation. After all, it brings change of pad stiffness and it could directly act on track and bridge as load transmission and impact force. In this study, we carried out laboratory test changing pad stiffness after making a model of 15m bridge and laying concrete slab track. Also, we carried out static and dynamic behaviors test(stress, natural frequency, damping ratio, vibrational acceleration, deflection) of bridge and track and experimentally analyzed them by change of elastic pad stiffness on rail fastener.

key words : railway bridge(철도교량), concrete slab track(콘크리트슬래브궤도), pad stiffness(패드강성)

1. 서 론

2004년 개통된 경부고속철도 1단계(서울~동대구)구간은 자갈도상궤도로 부설되었으며, 일부 터널구간에만 콘크리트슬래브궤도가 부설되었다. 하지만 현재 진행중인 경부고속철도 2단계(동대구~부산)구간과 호남고속철도는 향후 유지보수비용의 저감을 위한 경제적 효과 및 기술적 효과를 고려하여 콘크리트슬래브궤도로 부설될 예정이다. 자갈도상궤도는 열차하중을 도상자갈 입자간 마찰력에 의해 흡수 분산, 또는 탄성적으로 지지하게 되는데, 도상자갈을 콘크리트로 대체시킨 콘크리트슬래브궤도는 상대적으로 강성이 크므로 별도의 탄성대책이 수반되어야 한다. 이에 따라 콘크리트슬래브궤도 체결장치에서 요구되는 탄성치를 국내에서는 레일체결장치 성능시방서 기준에 20~50kN/mm(2~9.5tonf)의 범위에 있는 체결장치를 사용하도록 하고 있다.

보통 레일과 콘크리트 침목사이의 레일패드(레일의 마모방지, 절연기능, 동적하중 감쇄 등 다양한 기능을 제공해야하며, 이는 고속철도 소음·진동 저감을 위해 가능한 한 낮은 스프링정수의 필요성과 체결장치의 내구성에 대한 절충 역할을 필연적으로 하게 된다. 이러한 콘크리트슬래브궤도상 레일패드의 탄성이 부족할 경우 그림 1.과 같이 콘크리트침목에 비해 상대적으로 강도가 약한 콘크리트도상이 파손되면서 도상과 침목이 분리되는 현상이 발생할 수 있다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 정회원

E-mail : june1611@naver.com

TEL : (02)978-6575 FAX : (02)971-6575

** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정, 정회원

*** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

**** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원, 정회원

따라서, 본 연구에서는 15m 소수주형강합성교 모형을 제작하고 콘크리트슬래브궤도를 부설한 뒤 체결장치의 탄성패드 강성을 변화시켜가며 정적재하 및 동적가진시험을 수행하였다. 이를 통해 체결장치 탄성패드의 강성 변화에 따른 교량 및 궤도의 정·동적 거동을 실험적으로 분석하고자 하였다.



그림 1. 패드탄성 부족으로 인한 손상사례

2. 콘크리트슬래브궤도의 궤도지지강성

콘크리트슬래브궤도에서는 콘크리트 및 노반강성을 무시하고 탄성을 갖고 있는 층만을 고려하여 식 (1)에 의하여 강성을 구한다.

$$k_r = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (1)$$

여기서 n 은 탄성스프링이 있는 층수이고, k_i 는 각 층의 강성이다. 그림 2.와 같이 침목이 도상콘크리트에 매립되는 궤도구조에서는 탄성은 레일패드(k_1)와 베이스플레이트패드(k_2)에 의하여 제공되므로 식 (1)에 $n=2$ 를 대입하여 궤도지지계수를 구할 수 있다.

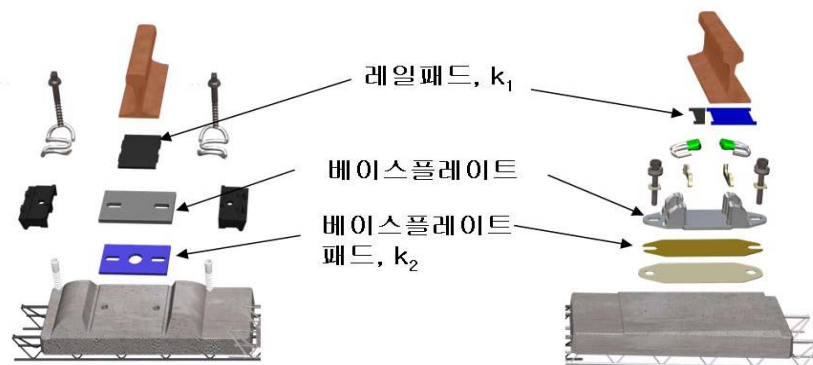


그림 2. 콘크리트슬래브궤도의 구성

3. 진동전달율(TR)[1]

그림 3.과 같은 단자유도계의 운동방정식은 식(2)와 같이 나타내며, 이 미분방정식의 해로부터 고유진동수는 식(3)과 같다. 또한, 가진력에 대한 전달력으로 나타내는 진동전달율(TR)은 식(4)와 같으며,

여기서 ζ 는 감쇠계수, r 은 진동수비(가진주파수/고유진동수)를 나타낸다.

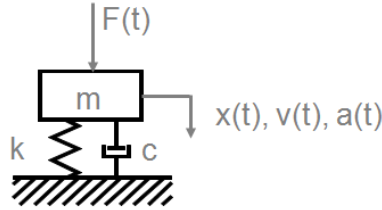


그림 3. 단자유도계 시스템

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(x) \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3)$$

$$TR = \frac{\sqrt{1 + (2r\zeta)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2r\zeta)^2}} \quad (4)$$

그림 4.는 진동전달율 대 진동수비에 대한 그래프로 모든 곡선들은 진동수비 $r = \sqrt{2}$ 에서 동일한 점을 통과하며, 감쇠는 $r > \sqrt{2}$ 일 때, 진동전달율이 감소되는 경향이 있음을 알 수 있다. 여기서, $f \ll f_n$ 일 경우 강성조절범위(stiffness controlled region, SCR), $f_n \ll f$ 일 경우 질량조절범위(mass controlled region, MCR), $f_n \approx f$ 일 경우 감쇠조절범위(damping controlled region, DCR)로 구분되어진다. 열차의 가진력에 대한 공진을 피하기 위해서는 감쇠비를 조절하는 방법이 가장 효과적이거나 이는 재료 및 구조에 따라 실내 가진시험 및 현장측정을 통해서 결정되는 값으로 콘크리트슬래브케도상에서 감쇠비를 조절하기에는 무리가 있으며, 자체 질량이 큰 플로팅슬래브케도를 제외하고 콘크리트슬래브케도의 질량을 증가시키는 것도 무리가 있다. 따라서 콘크리트슬래브케도의 경우 체결장치 및 콘크리트의 강성을 조절하여 공진을 피하는 것이 유리하다.

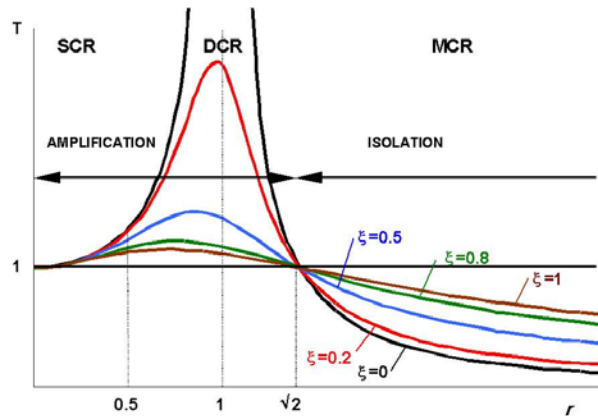


그림 4. 진동전달율(T) 대 진동수비(r)

4. 실내시험

4.1 시험체 제작

실내시험을 위한 시험체는 지간장 15m, 폭 3m, 높이 1.3m인 소주주형 강합성교로써 그림 5.와 같고, 적용한 케도구조모형의 특성은 표 1.과 같다.

시험체는 케도의 강성변화에 따른 교량의 동적응답의 변화를 알아보고자 체결구시스템에 동일한 재

질(EPDM)의 패드로 정적스프링계수만을 변화시켜가며 C-1(soft: $22.5 \pm 2.5 \text{ kN/mm}$), C-2(mid: $48.4 \pm 0.5 \text{ kN/mm}$), C-3(hard: $75.6 \pm 1.2 \text{ kN/mm}$)로 구분하여 시험을 수행하였다. C-1 패드는 기성제품이며, 시험을 위해 제작한 패드 C-2, C-3의 정적스프링계수 및 경도는 KRS TR 0010, KSM 6518에 의거 시험한 결과 각각 $48.4 \pm 0.5 \text{ kN/mm}$ (경도 60), $75.6 \pm 1.2 \text{ kN/mm}$ (경도 95)로 제시된 시편을 사용하였다.

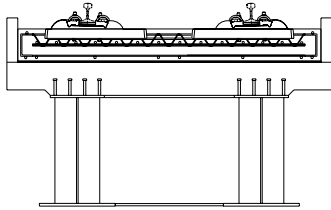



그림 5. 시험체 전경

표 1. 레도구조모형의 특성

	콘크리트레도	비고
레일	UIC 60(15m)	경부고속철도 적용 예정 레도시스템
침목	Rheda 2000 (22정, 간격: 625mm)	
체결장치	Vossloh system-300	Pad의 강성 조절용이
Pad 정적스프링계수 (kN/mm)	soft($22.5 \pm 2.5 \text{ kN/mm}$)	기성제품
	mid($48.4 \pm 0.5 \text{ kN/mm}$)	KRS TR 0010
	hard($75.6 \pm 1.2 \text{ kN/mm}$)	KS M 6518
두께(mm)	300	2차 고정하중 동일
총중량(kN)	300 (단위중량 : 25 kN/m^3)	
기타	탄성분리재($t=1.3 \text{ mm}$) 압축강도 : 32 MPa	캠플레이트 미설치 ∴ 교량연장 $\leq 25 \text{ m}$



① C-1 (soft)



② C-2 (mid)



③ C-3 (hard)

4.2 시험방법

하중조건은 국내에서 운행중인 KTX(170kN)의 축중에 대한 속도 및 부가적요인(레도틀림, 레일요철, 도상열화 등)에 따른 동적 유증변동을 고려하여 적용하중 및 진폭에 변화를 주어 표 2.와 같이 산정하였고, 아래와 같이 정적재하시험과 동적가진시험을 실시하였다.

- 정적재하시험 : 0~200kN까지 50kN단위로 증가시켜가며 재하
- 동적가진시험 : 표 2.와 같이 하중진폭에 변화를 주었으며, 일정 주기 이후에는 하중을 제거하여 자유진동파형을 통해 고유진동수 및 진동전달율을 확인

표 2. 적용하중 및 진폭

구분	Case 1	Case 2	Case 3	가진주파수
170kN	$161.9 \pm 8.1 (\pm 5\%)$	$147.8 \pm 22.2 (\pm 15\%)$	$136.0 \pm 34.0 (\pm 25\%)$	1~16Hz

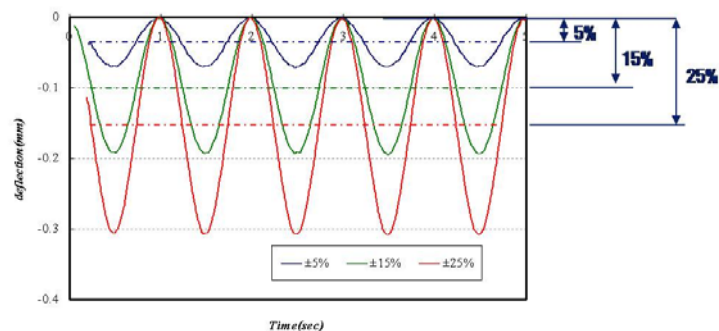


그림 6. 하중파형(예 - 4Hz)

4.3 측정센서 설치

궤도 및 교량의 정·동적거동에 대한 분석을 위해 하중이 재하되는 교량중앙부 궤도 및 거더에 그림 7.과 같은 측정센서를 부착하였고, 측정항목은 표 3.과 같다. 여기서, 하중에 따른 패드의 변위를 측정하기 위해 침목직상부 레일에 그림 7. (a)와 같이 변위계를 설치하였으며, 패드강성에 따른 침목의 전달메커니즘을 분석하기 위해 베이스플레이트 저면과 침목상부 표면에 변형률게이지를 부착하였다.

표 3. 측정항목

하부플랜지 strain	궤도 수직가속도
교량 수직가속도	패드수직변위
교량상판 수직가속도	침목수직가속도
교량 단부회전각	레일수직변위
교량수직변위	레일수직가속도
침목수직가속도	베이스플레이트 strain
침목수직변위	침목상부표면 strain
레일수직가속도	
레일수직변위	

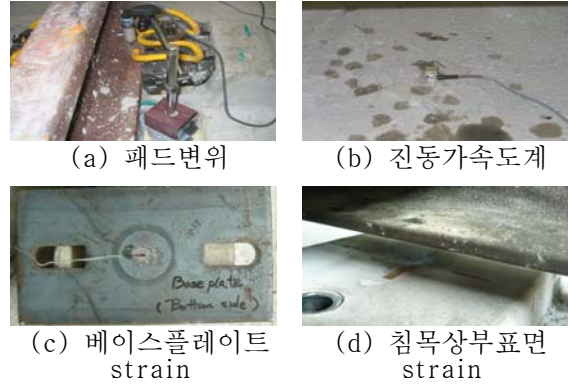


그림 7. 측정센서 설치 전경

5. 시험결과 분석

5.1 궤도/교량의 정적응답

콘크리트궤도 부설교량에 대해 패드의 강성을 변화시켜가며 측정한 궤도/교량의 정적응답을 비교·분석하였다. 그림 8.은 패드강성 변화에 따른 궤도 및 교량의 정적응답을 나타내며, 표 3.에 200kN 재하 시 궤도/교량의 정적응답을 비교하였다.



그림 8. 궤도 및 교량의 정적응답

표 3. 패드강성 변화에 따른 궤도/교량의 정적응답 비교(200kN 재하시)

구 분	C-1	C-2	C-3	비 고
베이스플레이트 응력 (MPa)	-10.73	-14.38	-23.62	-
	-	34.01%	120.13%	증가율
침목상부 응력 (MPa)	67.71	104.26	135.58	-
	-	53.98%	100.23%	증가율
거더 하부플랜지 응력 (MPa)	2.165	2.298	2.512	-
	-	5.78%	13.81%	증가율
교량 중앙부 변위 (mm)	0.925	0.972	1.06	-
	-	4.83%	12.73%	증가율

그림 8. (a)와 (b)로부터 체결장치의 강성이 클수록 베이스플레이트와 침목에 큰 응력이 발생하는 것을 알 수 있었으며, 거더 하부플랜지 응력에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 그림 8. (d)에서 알 수 있듯이 체결장치 패드의 강성이 작을수록 패드의 변위는 크게 발생하였고, 교량의 정적처짐이 작게 발생하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 동일한 하중에 대해 패드의 강성이 증가함에 따라 교량의 변위가 민감하게 작용하는 것을 알 수 있었다.

표 3.으로부터 패드강성을 3배이상 증가시킨 C-3의 경우 C-1에 비해 베이스플레이트 응력이 120.13%, 침목상부 응력이 100.23%, 거더하부플랜지 응력은 13.81%, 교량중앙부 변위는 12.73%가 증가하는 것으로 분석되었다. 이로부터 패드강성이 증가함에 따라 체결장치 및 침목의 하중부담율은 급격히 증가하고 거더의 하중부담율은 다소 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 패드의 강성이 콘크리트슬래브궤도에 미치는 영향은 크지만 전체 교량의 강성에 비해 매우 작기 때문에 거더에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

5.2 궤도/교량의 동적응답

5.2.1 고유진동수 및 감쇠비 분석

시험체 중앙에 1~16Hz까지의 가진력을 주어 교량의 동적응답을 측정하였으며, 측정시간은 시험체별 고유진동수를 산정하기 위해 하중 제거 후 일정시간동안 자유진동하는 파형까지를 측정하였다. 그림 9.는 레일의 수직진동가속도의 자유진동 파형에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 실시하여 각 시험체별 고유진동수를 산정한 결과이다.

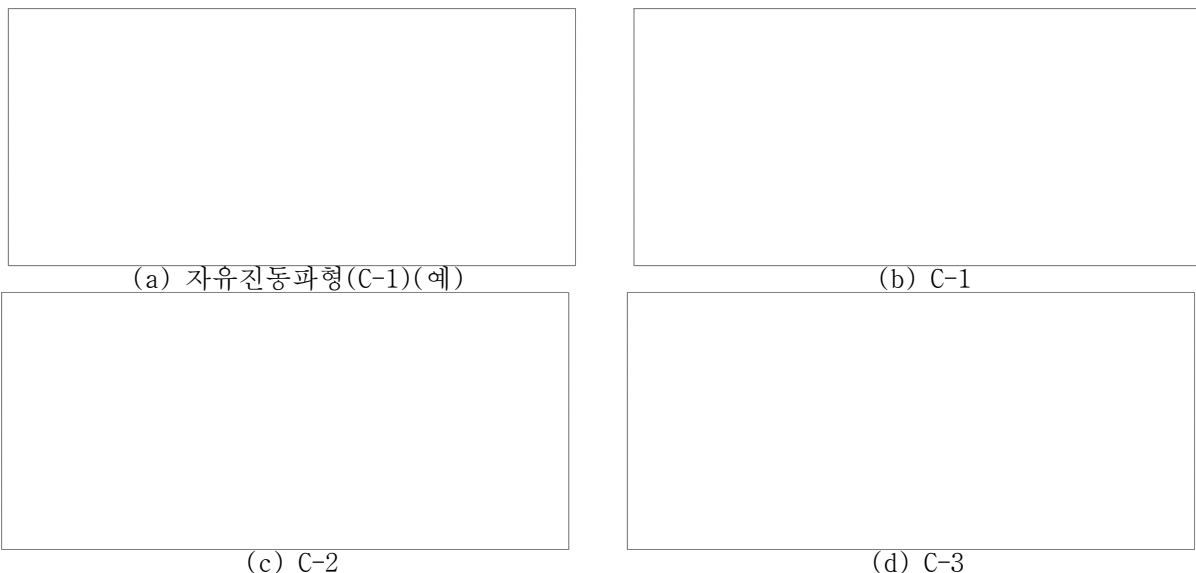


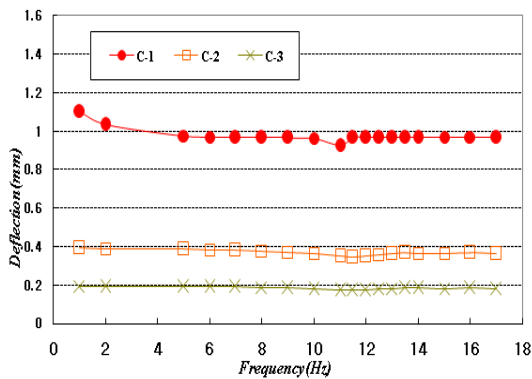
그림 9. 1st mode 궤도의 고유진동수 분석

또한, 그림 9. (a)와 같은 자유진동파형에 대해 1번째와 10번째 극대 진폭값을 식(5)에 대입하여 감쇠비를 산정하였다. 감쇠비 산정결과 하중 case별 감쇠비가 다르게 산정되기 때문에 각 하중 case별 측정데이터에 대해서 히스토그램 및 정규분포도를 작성하였다.[14] 여기서 각 시험체별 궤도의 감쇠비에는 다소 차이가 있었으나 그 범위가 미소하였으며, 본 논문에서는 각 시험체별 감쇠비를 약 1.24%로 동일하게 적용하였다.

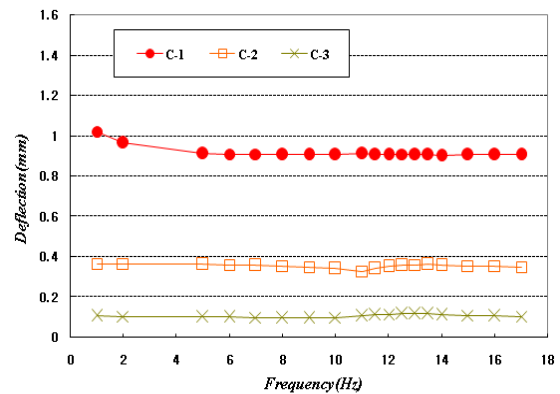
$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{u_i}{u_{i+n}} \right) \cong 2\pi\xi \quad (5)$$

5.2.2 가진주파수에 따른 영향

그림 10.는 가진주파수에 따른 레일 및 패드의 동적응답 검토결과이다. 여기서 레일 및 패드의 변위는 패드강성이 증가할수록 감소하였고, 가진주파수에 따른 레일 및 패드변위의 변화가 일정한 것은 측정센서가 콘크리트슬래브궤도 상면에 설치되어 교량과 일체 거동하였기 때문인 것으로 판단된다.



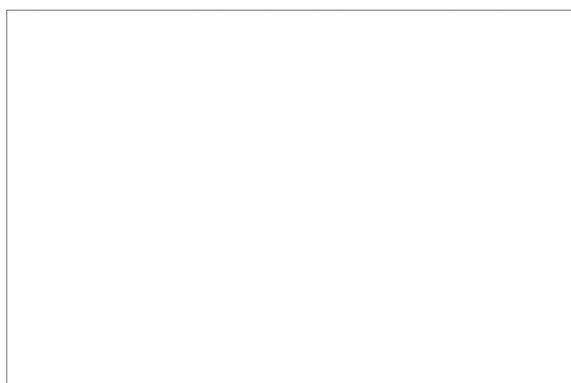
(a) 레일최대변위



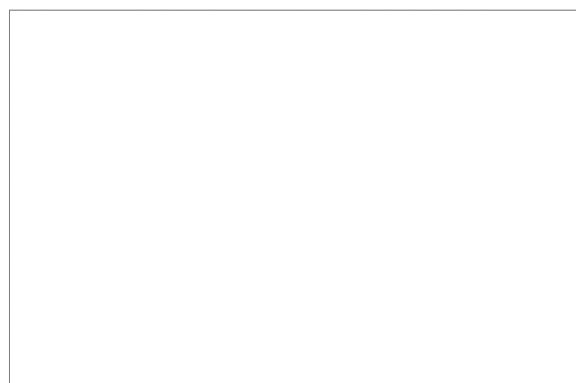
(b) 패드최대변위

그림 10. 가진주파수에 따른 궤도의 동적응답(170kN case3)

그림 11. (a)는 패드강성별 교량 중앙부 변위를 측정된 결과로 시험체의 고유진동수 대역에서 가장 큰 응답이 발생하였고, 11~13Hz에서 soft한 패드를 사용한 C-1의 경우에 비해 hard한 패드를 사용한 C-2, C-3 변위량이 각각 3.70%, 5.10% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 그림 11. (b)는 패드강성 변화에 따른 교량 중앙부 진동가속도 변화를 나타낸다. 여기서 C-2, C-3의 경우 C-1에 비해 공진 속도대역에서 진동가속도가 각각 12.64%, 14.89% 증가하는 것으로 나타났다.



(a) 교량 중앙부 변위



(b) 교량 중앙부 가속도

그림 11. 가진주파수에 따른 교량의 동적응답(170kN case3)

표 4. 패드강성 변화에 따른 교량의 동적응답 비교(12Hz)

구 분	C-1	C-2	C-3	비 고
교량 중앙부 변위 (mm)	1.301	1.351	1.371	
	-	3.70%	5.10%	증가율
교량 중앙부 진동가속도 (g)	0.297	0.340	0.349	
	-	12.64%	14.89%	증가율

5.2.3 진동전달율 분석

각 시험편에 대한 동적가진시험을 통해 산정한 고유진동수와 감쇠비를 통해 패드강성별 진동전달율(TR)을 산정하였으며, 그 결과는 그림 12.와 같다. 패드강성별 동일한 감쇠비를 적용하였기 때문에 C-1, C-2, C-3의 진동전달율이 동일하게 산정되었으나, 고유진동수의 차이로 진동수비에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

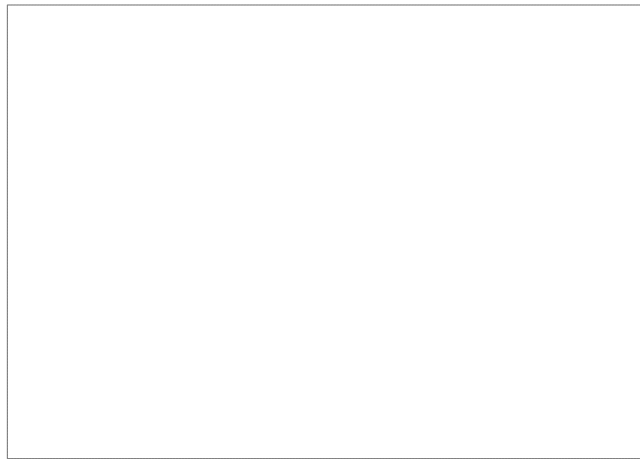


그림 12. 패드강성에 따른 진동전달율(TR)의 변화

6. 결론

본 연구는 향후 국내 고속철도에 적용 예정인 콘크리트슬래브케도의 체결장치에서 요구되는 패드의 강성이 레도 및 교량에 미치는 영향을 정·동적시험을 통해 알아보려고 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

정적재하시험결과, 패드의 강성이 증가할수록 침묵에 전달되는 하중이 크게 증가하였으며, 패드의 탄성이 부족할 경우 반복적인 하중으로 인해 침묵과 콘크리트가 분리되는 현상이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 패드강성이 작을수록 패드의 변위가 크게 발생하였고 교량의 변위 및 저부응력이 감소함에 따라 교량이 받는 하중부담을 일부 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

동적가진시험결과, 체결장치의 패드강성 증가에 따라 레도의 고유진동수가 증가하였으며, 공진주파수대역에서 교량의 처짐 및 진동가속도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 체결장치 패드의 강성변화로 진동수비가 변화하였으며 진동전달율이 변화시켜 레도의 고유진동수 대역을 변경할 수 있음을 알 수 있었다. 이로부터 콘크리트슬래브케도의 질량을 증가시켜 레도의 고유진동수를 저감시키는 것에 비해 체결장치 패드 강성 조절을 통해 레도의 고유진동수를 저감시키는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

따라서 향후 체결장치의 패드 선정 시 가진력(열차축간격 및 속도)에 따른 패드의 강성과 내구성을 고려하여 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 콘크리트슬래브케도 설계 시 요구되는 적정 수준

의 패드강성을 확보할 수 있도록 패드의 교체주기를 산정하여 관리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도시설공단의 “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구”로 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

7. 참고문헌

1. Anil K. Chopra, "Dynamics of structures"
2. E.C. Hambly, "Bridge Deck Behavior", E&PN SPON, 1991, pp 1-221.
3. Y.B Yang, "Vehicle-Bridge Interaction Dynamics"
4. Bernhard Lichtberger, "Track Compendium"
5. Coenraad Esveld, "Modern Railway Track"
6. Janusz P.Kogut, "high speed train induced vibrations: in situ measurements and numerical modelling", Tenth International Congress on Sound and Vibration, 2003. 7
7. International Standard, ISO 14837-1
8. 박용걸, “외부 후긴장 공법의 적용에 따른 공용중인 관형교 거동의 실험적 연구”, 토목학회 학술집, 2000
9. 박영훈, 박용걸, 전준창 “외부 후 직선긴장 보강공법적용에 따른 합성형의 동적거동”, 대한토목학회논문집, 2003
11. 김성일, “철도교량 동적성능 평가를 위한 동특성 추출 실험연구”, 한국철도학회, 2005
12. 박문석, 오지택, 최진유(2003), 열차유형에 따른 관형교의 정적 거동에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회
13. 한국철도기술연구원, “호남고속철도 설계관련 연구용역 제공자료”, 2007.2.28
14. 한국철도기술연구원, “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구-중간보고서”, 2007.12